

TENACIDADE À FRATURA DE MATERIAIS COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA PARA REPARO DE DUTOS DE AÇO¹

José Maurício Rodrigues Touça²
Enrique Mariano Castrodeza³
Fernando Luiz Bastian⁴

Resumo

No desenvolvimento de materiais compósitos para reparo de dutos danificados de aço é de fundamental importância a avaliação da sua tenacidade à fratura. O objetivo do trabalho foi estudar a aplicabilidade de metodologias para a avaliação da tenacidade à fratura em quatro tipos de materiais compósitos poliméricos reforçados por fibras de vidro utilizados no reparo de dutos. Com o intuito de se obter as propriedades mecânicas em tração (curvas tensão-deformação) destes materiais foram realizados testes de tração preliminares segundo a norma ASTM D-3039. A caracterização do seu comportamento em fratura foi inicialmente avaliada segundo a ASTM E-1922, desenvolvida para materiais compósitos poliméricos reforçados por fibras, baseada na determinação da tenacidade à fratura translaminar (K_{TL}). Posteriormente, foi utilizada uma metodologia baseada na avaliação do *CTOD* tradicional (δ) pela norma ASTM E-1820 (com modificações), e do *CTOD* de Schwalbe (δ_5). Os resultados mostraram que a metodologia definida na norma E-1922 não foi adequada para os materiais estudados, enquanto que os resultados indicaram que a metodologia do δ_5 foi interessante para a avaliação da tenacidade à fratura dos materiais estudados, sendo muito atrativa porque não depende de modelos matemáticos e pode ser facilmente aplicada em diferentes geometrias de corpos de prova.

Palavras-chave: Tenacidade à fratura; Materiais compósitos; Reparo de dutos.

FRACTURE TOUGHNESS OF POLYMER MATRIX COMPOSITE MATERIALS FOR PIPELINE REPAIR

Abstract

Much research has been done on the development of composite materials for damaged pipelines repair, but little has been done to characterize the fracture resistance of these materials which is of great interest for structural integrity evaluation at the project stage and/or for residual resistance analysis in service. The objective of this work was to study the applicability of methodologies for fracture toughness evaluation of four types of glass fiber reinforced polymer matrix composites with different lay-ups and volume fraction of fibers. Preliminary tensile tests have been made using the ASTM D-3039 standard obtaining the monotonic mechanical properties and stress-strain characteristic graphics of these materials. In order to obtain fracture characteristics of these composites, initially we studied the applicability of a methodology developed for fiber reinforced polymer composites based on translaminar fracture toughness (K_{TL}) evaluation according to ASTM E-1922 standard. The results showed that this methodology was not appropriate for the studied materials. We continued making a comparison between a methodology based on the *CTOD* (δ) and *J*-Integral evaluation according to ASTM E-1820 standard, with some modifications, and a more recent one based on the Schwalbe's *CTOD* (δ_5). The results indicated that the δ_5 methodology was interesting for fracture toughness evaluation of the studied materials, being very attractive because it does not depend on mathematical models and it can be easily applied to different specimen geometries.

Key words: Fracture toughness; Composites; Pipelines repair.

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² M.Sc., Aluno do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ

³ D.Sc., Pesquisador do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ

⁴ Ph.D., Professor do Programa de Eng. Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ

1 INTRODUÇÃO

Durante o serviço de dutos de aço usados no transporte terrestre de petróleo e seus derivados torna-se quase inevitável a perda de espessura causada por corrosão externa (em geral, decorrente de falhas na proteção catódica ou de danos no revestimento de proteção) ou interna (como consequência de umidade ou água no produto transportado). Assim, o domínio de tecnologia de reparo de dutos corroídos é de grande importância para a redução de custos no transporte de hidrocarbonetos. Por isso, algumas técnicas clássicas para reparo de dutos foram propostas ao longo dos anos, dentre elas podemos citar: a técnica de corte e substituição; a técnica de dupla calha soldada e a técnica de dupla calha com enchimento.⁽¹⁾ Essas técnicas apresentam algumas desvantagens, tais como o custo elevado devido à parada operacional, risco de acidentes, demora para a realização do reparo, entre outras. Por isso, é de suma importância a adoção de novas técnicas de reparo que associem eficiência a baixos custos.

Recentemente têm sido desenvolvidos reparos de materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de vidro. Entretanto, pouco tem sido feito para caracterizar a resistência à fratura desses compósitos. O objetivo deste trabalho foi estudar o comportamento em fratura de quatro materiais compósitos diferentes de matriz polimérica reforçados com fibras de vidro, usados como reparos de dutos. Anteriormente, Touça *et al.*⁽²⁾ utilizaram a metodologia indicada pela norma ASTM E-1922,⁽³⁾ proposta para a determinação da tenacidade à fratura translaminar de compósitos laminados de matriz polimérica, na tentativa de determinar os valores de tenacidade à fratura dos materiais estudados. Infelizmente esta metodologia não foi adequada para os materiais estudados.

Desta forma, a tenacidade à fratura desses materiais foi avaliada seguindo uma metodologia semelhante à desenvolvida por Castrodeza *et al.*⁽⁴⁻⁶⁾ para laminados fibra-metal, baseada na determinação e comparação entre os valores de *CTOD* (*Crack Tip Opening Displacement*) da ASTM e de Schwalbe através da utilização de corpos de prova do tipo compacto de tração (C(T)), de flexão em três pontos (SE(B)) e de tração com trinca central (M(T)).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Foram utilizados quatro compósitos de matriz polimérica reforçados por fibras de vidro.

Tabela 1. Características dos materiais estudados

Material	Matriz	Reforço	Fabricação	Empilhamento
MC1	Epóxi	Manta mais fibras de vidro unidirecionais	Laminação manual	Multidirecional (manta) mais reforço unidirecional
MC2	Poliéster	Fibras de vidro unidirecionais	Pultrusão	Unidirecional
MC3	Ureica	Tecido de fibra de vidro	Laminação manual	Bi-direcional (0°/90°)
MC4	Epóxi DGEBA	Tecido de fibra de vidro	Laminação manual	Bi-direcional (0°/90°)

Os mesmos diferem tanto no tipo de matriz quanto no arranjo e fração volumétrica de fibras utilizadas, como pode ser visto nas Tabelas 1 e 2, as quais apresentam características e propriedades mecânicas em tração dos materiais estudados, medidas por Fujiyama⁽⁷⁾ de acordo com a norma ASTM D-3039.⁽⁸⁾

Os materiais denominados neste trabalho de MC1, MC2 e MC3 são comerciais e fabricados, respectivamente, pelas empresas Rust Engenharia Ltda., Clock Spring Company e StrongBack Corporation. O material MC4 foi produzido no nosso laboratório.

Tabela 2. Propriedades mecânicas e % de fibras em peso dos materiais.⁽⁷⁾

Material		σ_{\max} (MPa)	ϵ_{\max} (%)	E (GPa)	% de fibras em peso
MC1	Média	383,75	2,40	21,11	58,98
	Desv. Pad.	10,95	0,10	0,59	0,81
MC2	Média	378,48	1,20	31,89	54,32
	Desv. Pad.	7,85	0,10	3,90	4,90
MC3	Média	369,05	1,30	28,66	51,14
	Desv. Pad.	6,48	0,08	2,15	1,66
MC4	Média	376,83	2,60	20,53	44,53
	Desv. Pad.	12,56	0,05	1,85	1,39

2.1.1 Corpos de prova

Após testes preliminares para avaliar a aplicabilidade dos corpos de prova aos materiais estudados, foi possível constatar que:

- O material MC1, entalhado somente na direção transversal às fibras, só pôde ser testado com o corpo de prova SE(B), pois a trinca se propagou no plano perpendicular ao entalhe nos corpos de prova C(T);
- O material MC2, com reforço em apenas uma direção, não se adequou aos dois corpos de prova propostos (C(T) e SE(B)), nem a outros dois tipos: corpos de prova de tração com entalhe central (M(T) de pequena largura) e corpos de prova de tração com duplo entalhe lateral (DE(T)). Em todos os casos, a trinca se propagou no plano perpendicular ao entalhe;
- O material MC3 foi estudado mediante a utilização tanto de corpos de prova do tipo C(T) quanto com os do tipo SE(B) e
- O material MC4 não pôde ser estudado com a utilização de corpos de prova C(T) nem SE(B) devido à delaminação. O problema foi resolvido com a utilização de corpos de prova do tipo M(T) com pequena largura.

As Figuras 1 e 2 ilustram as dimensões dos 3 (três) tipos de corpos de prova utilizados. A espessura os corpos de prova foi a própria espessura dos materiais (aproximadamente 3,0 mm), o que é permitido pela norma. Os corpos de prova C(T) foram usinados com entalhe agudo, realizado mediante fresa serra afiada em ângulo de 30° e acabado com corte com estilete. De forma similar foram usinados os entalhes nos corpos de prova SE(B), optando-se por uma modificação na geometria da boca do entalhe para evitar a utilização de facas porta-clip.

Os corpos de prova M(T) (vide Figura 2) foram usinados com pequena largura ($W=25$ mm), de forma a manter uma relação $2a/W < 0,3$. Neste caso as extremidades foram reforçadas com *tabs*.

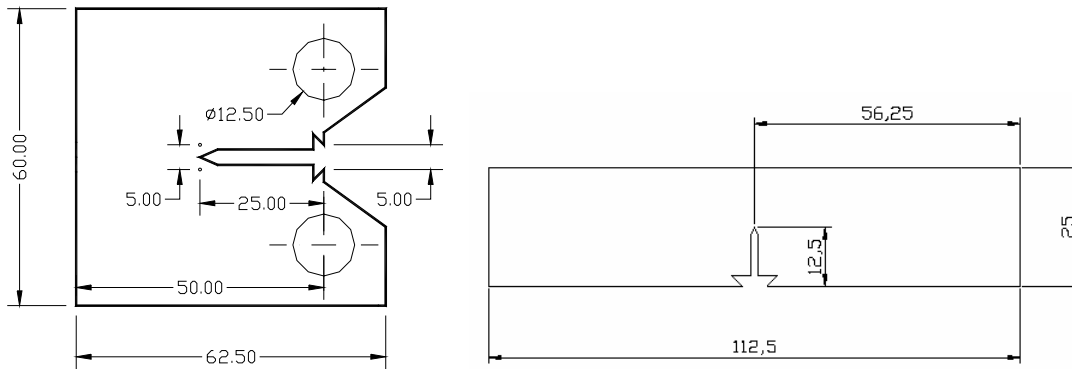


Figura 1. Dimensões dos corpos de prova C(T), ($W = 50,0$ mm) e SE(B), ($W = 25$ mm).

O entalhe central foi usinado a partir de um furo com o uso de uma broca de 2,0 mm e depois terminado com uma serra de joalheiro, permitindo uma geometria das raízes das trincas do tipo U, com raio de raiz de, aproximadamente, 0,2 mm.

Foram, então, confeccionados 5 (cinco) corpos de prova para cada material estudado.

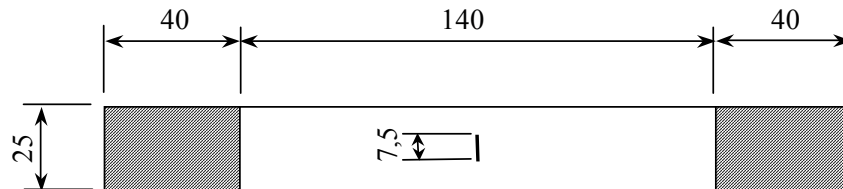


Figura 2. Dimensões dos corpos de prova M(T), ($W = 25,0$ mm).

2.2 Metodologia

A tenacidade à fratura dos compósitos estudados foi avaliada mediante a determinação dos valores de $CTOD$ (δ) pela norma ASTM E-1820⁽⁹⁾ e pelo $CTOD$ de Schwalbe (δ_5),⁽¹⁰⁾ segundo a metodologia recentemente desenvolvida por Castrodeza *et al.*,⁽⁴⁻⁶⁾ para a avaliação da tenacidade à fratura de compósitos laminados fibra-metal. Esta metodologia utiliza corpos de prova normalizados com pequenas modificações e contorna problemas como flambagem, desvio de trinca e indentações, que aparecem quando os procedimentos da ASTM são estritamente aplicados.

Nos materiais MC1 e MC2 os entalhes foram efetuados perpendicularmente à direção de maior resistência do material, ou seja, na direção perpendicular às fibras unidirecionais. No caso dos materiais MC3 e MC4, que apresentam o reforço na forma de tecido com as fibras alinhadas a 0 e 90°, esta atenção não se torna necessária.

2.2.1 Determinação do ponto crítico

Quando os registros apresentaram instabilidades, os valores críticos de tenacidade dos materiais foram calculados na primeira instabilidade significativa (definida de acordo com a norma ASTM E-1820). Em registros sem instabilidades a tenacidade à fratura foi calculada na carga máxima.

2.2.2 Equipamentos e ensaios

Para a realização da parte experimental foram utilizadas uma máquina de ensaios mecânicos MTS, modelo 810; um extensômetro Instron, modelo 2610-012 para medida da abertura da boca da trinca (*CMOD*) nos corpos de prova C(T) e SE(B); um extensômetro Instron, modelo 2620-525 para medida do deslocamento nos corpos de prova do tipo M(T); e um extensômetro Instron, modelo 2620-530, modificado, no qual as facas foram substituídas por pontas agudas para a medição do *CTOD* de Schwalbe (δ_5) nos 3 (três) tipos de corpos de prova. Os testes foram realizados sob controle de deslocamento, a uma taxa de 1,0 mm/min.

3 RESULTADOS

A Figura 3 ilustra um gráfico característico das curvas de carregamento *versus* deslocamento na boca do entalhe (*P vs. CMOD*) e carregamento *versus* *CTOD* de Schwalbe (*P vs. δ_5*) de um corpo de prova do material MC1 estudado. Os registros são representativos daqueles obtidos a partir dos outros corpos de prova dos materiais MC1 e MC3.

Uma vez que não é possível utilizar um *clip-gauge* para medida de *CMOD* nos corpos de prova do tipo M(T), o material MC4 foi avaliado mediante um extensômetro para medida do deslocamento do corpo de prova, como foi mostrado no item anterior. Sendo assim, para este material apresentamos os gráficos característicos das curvas de carregamento *versus* deslocamento do corpo de prova (*P vs. ν*) e carregamento *versus* *CTOD* de Schwalbe (*P vs. δ_5*), como pode ser visto na Figura 4. Os registros são representativos daqueles obtidos a partir dos outros corpos de prova do material MC4.

Foi possível perceber que, para o mesmo material, alguns corpos de prova apresentaram tanto registros com instabilidades como registros com carregamento até o ponto de carga máxima e posterior queda suave. A partir da determinação do ponto crítico (instabilidade ou carga máxima) nas curvas *P vs. CMOD* dos materiais MC1 e MC3, foi possível calcular os valores críticos do *CTOD* utilizando as equações presentes na norma ASTM E-1820, de acordo com o tipo de corpo de prova utilizado. No caso do material MC4 não conseguimos obter os valores de *CTOD*, pois não é possível medir o *CMOD* no tipo de corpo de prova adotado para os ensaios com este material.

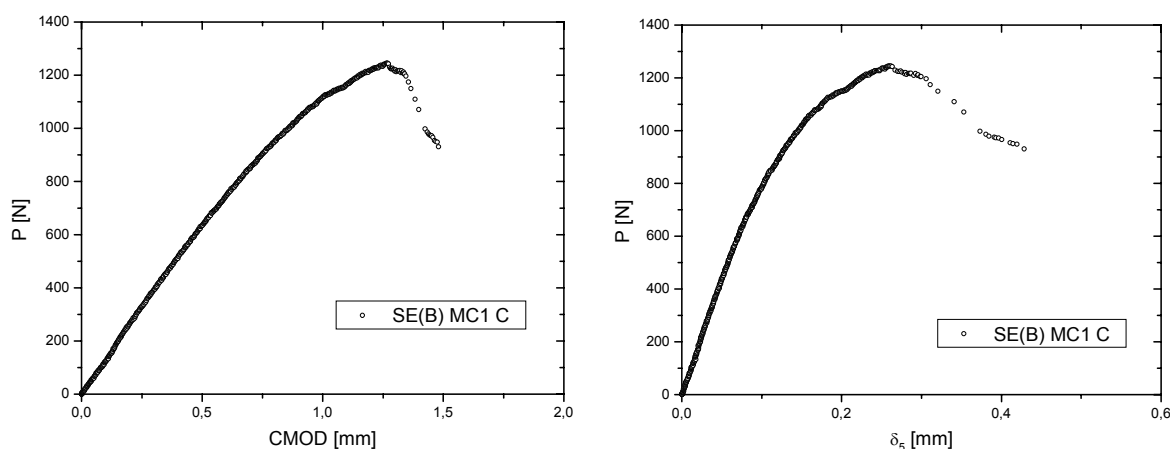


Figura 3. Curvas *P versus CMOD* e *P versus δ_5* representativas do material MC1, utilizando corpo de prova do tipo SE(B).

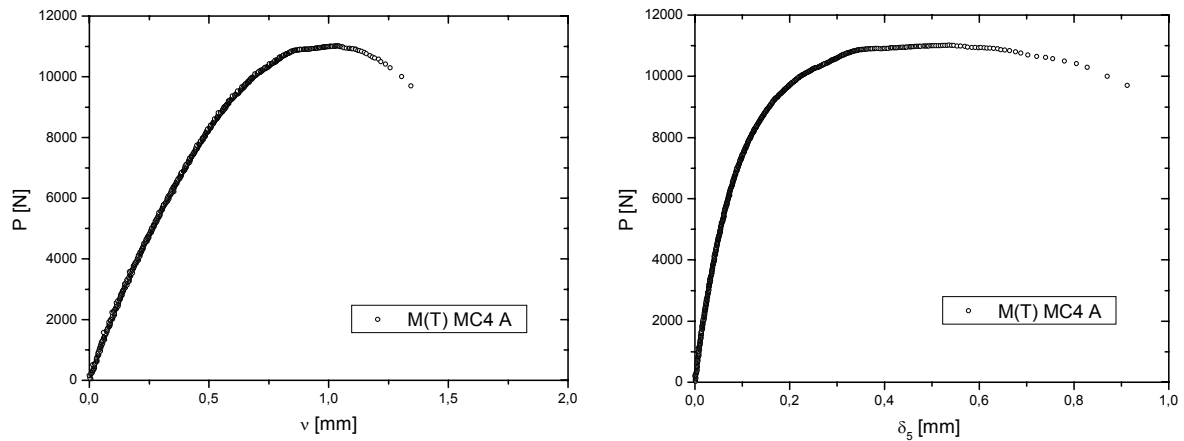


Figura 4. Curvas P versus v e P versus δ_5 representativas do material MC4, utilizando corpo de prova do tipo M(T).

Como a norma ASTM E-1820 foi desenvolvida para materiais metálicos e de grande espessura, uma série de considerações e aproximações foi necessária para adequá-la aos materiais estudados. A Tabela 3 mostra a média e o desvio padrão dos valores críticos do $CTOD$ ($m=2$ e $m=1$) e do δ_5 dos corpos de prova testados.

Tabela 3. Média dos valores críticos do $CTOD$ (δ) e δ_5

Material	K (MPa.m ^{1/2})	δ_c ($m=2$) (mm)	δ_c ($m=1$) (mm)	δ_{5c} (mm)
MC1 SE(B)	19,55 ± 0,88	0,11 ± 0,04	0,13 ± 0,04	0,23 ± 0,04
MC3 SE(B)	8,00 ± 0,35	0,09 ± 0,02	0,09 ± 0,02	0,19 ± 0,04
MC3 C(T)	8,35 ± 0,40	0,17 ± 0,02	0,17 ± 0,02	0,25 ± 0,03
MC4 M(T)	17,18 ± 0,38	*****	*****	0,60 ± 0,17

4 DISCUSSÃO

De acordo com a equação (1), o $CTOD$ é determinado a partir da soma de uma componente elástica e uma plástica.

$$\delta = \frac{K^2(1-\nu^2)}{2\sigma_{YS}E} + \frac{r_p(W-a_0)v_{pl}}{[r_p(W-a_0)+a_0+z]} \quad (\text{Eq. 1})$$

Na componente elástica existem três considerações a fazer: o termo $(1-\nu^2)$ foi descartado devido à pequena espessura dos materiais estudados e devido à dificuldade na determinação do módulo de Poisson (ν) dos mesmos; o valor da constante m do denominador é igual a 2 para materiais metálicos e de grande espessura uma vez que esses materiais se encontram em um estado plano de deformações. Entretanto, podemos adotá-lo igual a 1 se considerarmos que, devido à pequena espessura dos materiais estudados, estes podem encontrar-se em um estado plano de tensões; por último, o valor de σ_{LE} (tensão limite de escoamento), característico de materiais dúcteis, foi substituído pelo valor de σ_R (tensão limite de

resistência), levando em consideração que os materiais estudados apresentaram comportamento frágil nos ensaios de tração. Essas considerações, necessárias para utilizar as equações da norma ASTM E-1820 nos materiais deste trabalho, acarretou uma queda significativa da parcela do *CTOD* elástico em relação a do *CTOD* plástico. Aparentemente o problema maior encontra-se na utilização de σ_R , que pode ter resultado em uma subestimação dos valores da componente elástica do *CTOD* no caso dos materiais MC1 e MC3.

Os valores críticos do δ_5 foram obtidos diretamente dos gráficos *P vs. δ_5* de cada corpo de prova ensaiado, uma vez que este parâmetro é independente de modelos matemáticos.

A Tabela 3 mostra que os valores de δ com $m=1$ são ligeiramente superiores aos valores quando $m=2$, no caso do material MC1. No caso do material MC3 os valores de δ , considerando $m=1$ e $m=2$, são basicamente iguais. Esta diferença não foi mais significativa porque os valores da componente elástica do δ para os materiais MC1 e MC3 foram muito pequenos. O valor de $m=1$ representaria melhor o estado de tensões na ponta do entalhe dos materiais estudados.

Outra observação em relação à Tabela 3 é que os valores de K , δ e δ_5 são próximos para o material MC3, considerando os dois corpos de prova utilizados. Por outro lado foi feita uma análise estatística baseada na distribuição t de Student considerando a média amostral e o desvio padrão dos valores de δ_5 e um nível de confiança de 95%. Pela distribuição estatística F de Snedecor foi possível identificar a diferença das variâncias, comprovando que os valores de δ_5 obtidos para este material, usando os dois corpos de prova, são estatisticamente diferentes.⁽¹¹⁾

Alguns corpos de prova apresentaram curvas com instabilidades que não chegaram a ser significativas segundo a norma ASTM E-1820 (queda inferior a 5 %). Em alguns deles o ponto de instabilidade coincidiu com o ponto de carga máxima. No caso dos materiais MC1 e MC3 foi possível comprovar que as curvas *P vs. CMOD* são lineares inicialmente, mas desviam dessa linearidade à medida que se aproximam do ponto crítico (carga máxima ou instabilidade) do material. Este comportamento também foi observado no trabalho realizado por Solar e Belzunce (12) sobre tenacidade à fratura (K_{IC}) e curvas de resistência de compósito de resina poliéster reforçada por fibras de vidro. Neste estudo, os autores relacionam este desvio da linearidade nas curvas *P vs. COD* com um pequeno crescimento de dano precedendo a fratura, uma vez que esse tipo de material não deforma plasticamente.

Com a finalidade de comparar, ponto a ponto, os valores do δ (ASTM) com os valores do δ_5 , foram traçadas curvas contínuas *P vs. δ* utilizando a equação (1) para os materiais MC1 e MC3. Em seguida, foram determinados os valores correspondentes de δ ($m=2$ e $m=1$) e δ_5 para cada ponto de carregamento e, com isso, traçadas as curvas *$\delta vs. \delta_5$* para todos os corpos de prova ensaiados destes materiais. Nestas curvas foi traçada, também, uma reta identidade para facilitar a análise dos resultados. A Figura 5 ilustra um exemplo desse registro, no qual percebemos que não existe uma identidade entre os dois parâmetros de *CTOD* determinados. Considerando como referência os valores de δ_5 , os valores de δ foram subestimados. Para o material MC3 praticamente não existe diferença nas curvas considerando os valores de $m=1$ e $m=2$. No caso do material MC1 essa diferença foi mais acentuada, comprovando o que já havia sido mostrado pela Tabela 3.

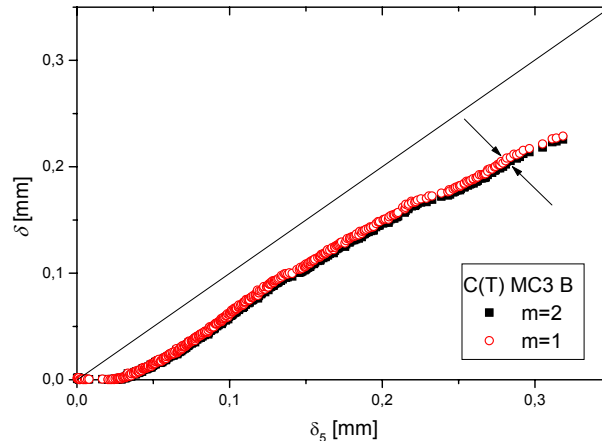


Figura 5. Curva δ ($m=2$ e $m=1$) vs. δ_5 representativa do material MC3, corpo de prova C(T). O ponto crítico está indicado no gráfico com uma seta.

5. CONCLUSÕES

Considerando os resultados obtidos, apresentados no item 3 e baseado nas discussões apresentadas no item 4, podemos concluir que:

- As curvas características de P vs. $CMOD$ dos materiais MC1 e MC3 apresentaram-se inicialmente lineares, mas com desvio dessa linearidade próximo da carga máxima;
- As curvas características de P vs. v do material MC4 mostraram-se, também, lineares inicialmente com desvio próximo ao ponto crítico (carga máxima);
- As considerações e aproximações utilizadas para a determinação dos valores de $CTOD$ (δ) a partir dos valores de $CMOD$, segundo a norma ASTM E-1820, proporcionaram a subestimação da componente elástica do $CTOD$, provavelmente em consequência da substituição dos valores de σ_{LE} pelos valores de σ_R dos materiais;
- Os valores de K_{max} dos materiais MC1 e MC4 são similares, apesar do valor médio de δ_{5C} do material MC4 ser superior ao do material MC1. Os valores de K_{max} do material MC3 são inferiores aos dos outros materiais, mas os valores médios de δ_{5C} são próximos do valor médio do material MC1. Apesar dos valores de K_{max} do material MC3, obtidos através dos dois tipos diferentes de corpos de prova, serem similares, os valores de δ_{5C} são estatisticamente diferentes;
- No caso dos materiais MC1 e MC3, e considerando cada material individualmente, os valores de δ_C são basicamente iguais, adotando valores de $m=1$ e $m=2$. Esta igualdade provavelmente pode ser explicada pela subestimação da componente elástica do $CTOD$, que abrange o valor dessa constante. Os valores de δ_{5C} são superiores aos valores de δ_C para todos os corpos de prova dos materiais MC1 e MC3 e
- A metodologia do δ_5 é interessante e útil para a avaliação da tenacidade à fratura nestes materiais, sendo muito atrativa porque não depende de modelos matemáticos e pode ser facilmente aplicada em diferentes geometrias de corpos de prova.

Agradecimentos

À ANP pela bolsa de estudos para J. M. R. Touça e pelo apoio financeiro. Ao CNPq, CNPq/CT PETRO e FINEP/CT PETRO pelo apoio financeiro. Ao Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento (IPD) do Exército do Brasil pela liberação dos equipamentos para a realização da parte experimental deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 HASSUI, L. H., *Análise Estrutural de Dutos Reparados por Material Compósito*, Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1999.
- 2 TOUÇA, J. M. R., BASTIAN, F. L., "Fratura de Materiais Compósitos Utilizados em Reparo de Dutos", *PETRO & Química*, Ed. Valete, nº. 253, pp. 99-102, 2003.
- 3 ASTM E-1922, Standard Test Method for Translaminar Fracture Toughness of Laminated Polymer Matrix Composite Materials. In: *1999 Annual Book of ASTM Standards*, vol. 3.01, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p. 1077-1081, 1999.
- 4 CASTRODEZA, E. M., *Desenvolvimento e avaliação de técnicas experimentais para os estudo da mecânica da fratura de laminados fibra-metal*, Tese D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2002.
- 5 CASTRODEZA, E. M., TOUÇA, J. M. R., IPIÑA, J. E. P., BASTIAN, F. L., "Determination of $CTOD_c$ in Fibre Metal Laminates by ASTM and Schwalbe Methods", *Materials Research*, v. 5, nº2, pp. 119-124, 2002.
- 6 CASTRODEZA, E. M., PEREZ IPIÑA, J. E., BASTIAN, F. L., Experimental Techniques for Fracture Instability Toughness Determination of Unidirectional Fibre-Reinforced Metal Laminates, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, v.25, n.11, pp. 999-1008, 2002.
- 7 FUJIYAMA, R. T., *Materiais Compósitos para Reparos de Dutos em Ambiente Terrestre com Defeitos Internos*, Tese D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2004.
- 8 ASTM D-3039, "Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials", In: *2001 Annual book of ASTM Standards*, v. 15.03, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 163-168, 1993.
- 9 ASTM E-1820, "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness", In: *1999 Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 3.01, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 972-1005, 1999.
- 10 SCHWALBE, K.-H., "Introduction of δ_5 as an Operational Definition of the CTOD and Its Practical Use", *Fracture Mechanics*, Vol. 26, ASTM STP 1256, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1995.
- 11 BUSSAB, W. O., MORETTIN, P. A., *Estatística Básica*, 4ª Ed., São Paulo, Atual, 1987.
- 12 SOLAR, M. A., BELZUNCE, F. J., "Fracture toughness and R-curves of glass fibre reinforced polyester", *Composites*, v.20, n.2, pp. 120-124, March 1989.